

## 分散補償モジュールおよびこれを用いた光伝送システム

### 背景技術

#### 1) 技術分野

本発明は、分散補償モジュールおよびこれを用いた光伝送システムに関する。

#### 2) 関連技術

従来、WDM伝送の伝送路に累積される分散および分散スロープを補償する分散補償モジュールは、たとえばCバンド（1530～1565 nm）、Lバンド（1565～1625 nm）、またはSバンド（1460～1530 nm）等の特定の信号波長帯域に対して最適な分散補償特性を呈する一種類の分散補償ファイバによって構成されている。

たとえば、1290～1330 nmの範囲の波長における低分散動作に対して最適化されている光ファイバの分散を補償するための分散補償モジュールは、波長1550 nmにおいて $-65.5 \text{ ps/nm/km}$ の分散を呈する一種類の分散補償ファイバによって構成されている（特許文献1 参照）。

#### 特許文献1

特開平6-11620号公報

伝送速度の高速化が進むWDM伝送において、一種類の分散補償ファイバによって構成された分散補償モジュールを用いて伝送路に累積される分散および分散スロープを補償する場合、この伝送路の残留分散のばらつきが、高速WDM伝送の伝送路として許容可能な残留分散の範囲、すなわち分散トレランスを超える程度に大きくなる場合が生じるという問題点がある。なお、この分散トレランスを超える残留分散のばらつきは、WDM伝送における光波形劣化を引き起こし、延いては符号間干渉による誤動作を引き起こす原因であり、かつ、WDM伝送における伝送速度の高速化を制限する原因である。

さらに、CバンドおよびLバンドなどの複数の波長帯を使用するWDM伝送において、その伝送路に累積される分散を補償する場合、一種類の分散補償ファイバによって構成された分散補償モジュールを用い、すべての波長帯を同時に補償することは困難である。このため、普通は、信号光を各信号波長帯域に分離した後、各々の信号波長帯域の信号光を個別に補償するための複数の分散補償ファイバが必要となるが、WDM伝送を行う光伝送システムの構成が複雑になるという問題点がある。

なお、WDM伝送の光増幅手段としてラマン増幅を用いた場合、CバンドおよびLバンドの両信号波長帯域の信号を同時に増幅することができる。このため、その光伝送システムを構成する上で極めて有利であるが、上述した分散補償の事情によって、この有利性が打ち消される場合が多い。したがって、CバンドおよびLバンドの両波長帯の信号を同時に補償できる分散補償ファイバによって構成された分散補償モジュールの実現が、切望されている。

## 発明の開示

本発明は、分散補償後の伝送路における残留波長分散のばらつきを抑制し、高速化されたWDM伝送における伝送路の分散補償を実現する分散補償モジュールを提供することを目的とする。

さらに、本発明は、分散補償後の伝送路における残留波長分散のばらつきを抑制し、高速化されたWDM伝送における伝送路の分散補償を実現する分散補償モジュールを用いた光伝送システムを提供することを目的とする。

本発明にかかる分散補償モジュールは、伝送用光ファイバに累積される所定の信号波長帯域の分散および分散スロープを補償する少なくとも二つの分散補償ファイバを有する分散補償モジュールであって、負の分散値および負の分散スロープを有する第1の分散補償ファイバと、前記第1の分散補償ファイバが有する負の分散値および負の分散スロープとそれぞれ異なる負の分散値および負の分散ス

ロープを有する第2の分散補償ファイバと、前記第1の分散補償ファイバおよび前記第2の分散補償ファイバを直列に接続する接続手段と、を備え、前記所定の信号波長帯域は少なくとも1530～1625 nmを含む任意の信号波長帯域であり、前記第1の分散補償ファイバが有する負の分散スロープは、波長変化にともない上に凸の変化を呈し、前記第2の分散補償ファイバが有する分散スロープは、波長変化にともない下に凸の変化を呈することを特徴とする。

本発明によれば、接続手段が、負の分散値および負の分散スロープを有する第1の分散補償ファイバと、該第1の分散補償ファイバが有する負の分散値および負の分散スロープとそれぞれ異なる負の分散値および負の分散スロープを有する第2の分散補償ファイバとを直列に接続し、さらに、少なくとも1530～1625 nmを含む任意の信号波長帯域において、前記第1の分散補償ファイバが有する分散スロープが波長変化にともない上に凸の変化を呈し、前記第2の分散補償ファイバが有する分散スロープが波長変化にともない下に凸の変化を呈するので、WDM伝送の伝送路における累積分散および累積分散スロープを確実に補償できるとともに、分散補償後の伝送路に残留する波長分散の値のばらつきを抑制することができる。また、少なくとも1530～1625 nmを含む任意の信号波長帯域でのWDM伝送の累積分散および累積分散スロープを確実に補償できる。

。

また、本発明にかかる光伝送システムは、本発明の分散補償モジュールを少なくとも備えたことを特徴とする。

本発明によれば、高速化WDM伝送に適した光伝送システムを実現できる。

#### 図面の簡単な説明

図1は、実施の形態1にかかる分散補償モジュールの概略構成を示す模式図である。

図 2 は、実施の形態 1 にかかる分散補償モジュールおよびその変形例における分散補償ファイバ同士の接続部の構成を示す縦断面図である。

図 3 は、実施の形態 1 にかかる分散補償モジュールの変形例の概略構成を示す模式図である。

図 4 は、実施の形態 1 にかかる分散補償モジュールを構成する第 1 の分散補償ファイバ、第 2 の分散補償ファイバ、および伝送用光ファイバの波長分散特性を示す相関図である。

図 5 は、実施の形態 1 にかかる分散補償モジュールを構成する第 1 の分散補償ファイバのみを用いて分散補償した後の伝送用光ファイバの波長分散特性および波長分散特性のばらつきを示す波長対分散の相関図である。

図 6 は、実施の形態 1 にかかる分散補償モジュールを用いて分散補償した後の伝送用光ファイバの波長分散特性および波長分散特性のばらつきを示す波長対分散の相関図である。

図 7 は、実施の形態 2 にかかる分散補償モジュールの概略構成を示す模式図である。

図 8 は、実施の形態 2 にかかる分散補償モジュールの波長分散特性を示す図である。

図 9 は、実施の形態 2 における伝送用光ファイバの補償後の残留分散の波長特性を示す図である。

図 10 は、実施の形態 2 にかかる分散補償ファイバ、分散補償モジュールおよび伝送用光ファイバの分散スロープの波長に対する関係を示す図である。

図 11 は、実施の形態 2 にかかる分散補償モジュールを構成する分散補償ファイバの屈折率プロファイルおよび横断面図を例示する図である。

図 12 は、実施の形態 3 にかかる光伝送システムの概略構成を示すブロック図である。

発明を実施するための最良の形態

本発明は、波長分割多重伝送（WDM伝送）の伝送路として用いる光ファイバに接続することによって、WDM伝送路に累積される分散および分散スロープを補償する分散補償モジュールおよびこれを用いた光伝送システムに関する。

以下に、本発明にかかる分散補償モジュールおよびこれを用いた光伝送システムの実施の形態を図面に基づいて詳細に説明する。なお、この実施の形態により本発明が限定されるものではない。また、本発明で述べるS-バンド、C-バンド、およびL-バンドとは、ITU-T（国際電気通信連合）が定めた光波長帯域の定義に基づく帯域名である。

（実施の形態1）

図1は、本発明の実施の形態1にかかる分散補償ファイバ10の全体構成例を示す模式図である。図1において、分散補償モジュール10は、分散補償ファイバ11および分散補償ファイバ12、ならびに、ボビン14およびボビン15、さらに接続部13によって構成されている。また、分散補償モジュール10の端部は、接続部16を介して伝送用光ファイバ18と直列にコネクタ接続されており、さらにもう一方の端部は、接続部17を介して伝送用光ファイバ18と直列にコネクタ接続されている。

分散補償ファイバ11は、分散値 $D1$  [ $\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ ] および分散スロープ $S1$  [ $\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ ] を有しており、ボビン14に巻き付けられている。

分散補償ファイバ12は、分散値 $D2$  [ $\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ ] および分散スロープ $S2$  [ $\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ ] を有しており、ボビン15に巻き付けられている。ここで、分散補償ファイバ12の分散値 $D2$ および分散スロープ $S2$ は、分散補償ファイバ11の分散値 $D1$ および分散スロープ $S1$ とそれぞれ異なる値であり、所定の信号波長帯域における最長波長において $D1/S1 \leq D2/S2$ の関係が成立する。

つぎに、分散補償ファイバ11および分散補償ファイバ12を直列に融着接続する接続部13の構成について、図2を参照して詳細に説明する。図2は、接続部13の構成を示す縦断面図である。

図2において、分散補償ファイバ11のガラス層131および分散補償ファイバ12のガラス層132は、接触面C1を境界に直接融着接続されている。ガラス層131の融着接続部付近以外はUV硬化樹脂による被覆膜133によって保護され、また、ガラス層132の融着接続部付近以外はUV硬化樹脂による被覆膜134によって保護されており、さらに、この融着接続部付近はUV硬化樹脂による被覆膜135によって保護されている。また、被覆膜133、134の外径はR1であり、被覆膜135の外径はR2である。

なお、本発明の実施の形態1の変形例として、ボビン14およびボビン15を1体化した構造を有する分散補償モジュール20がある。分散補償モジュール20の構成について、図3を参照して詳細に説明する。

図3は、分散補償モジュール20の全体構成例を示す模式図である。図3において、分散補償モジュール20は、分散補償ファイバ11、分散補償ファイバ12、および、ボビン21、さらに接続部13によって構成されている。また、分散補償モジュール20の端部は、接続部16を介して伝送用光ファイバ18と直列にコネクタ接続されており、さらにもう一方の端部は、接続部17を介して伝送用光ファイバ18と直列にコネクタ接続されている。

接続部13を介して直列に融着接続された分散補償ファイバ11および分散補償ファイバ12は、1体のボビン21に巻き付けられている。なお、分散補償ファイバ11および分散補償ファイバ12がボビン21に巻き付けられる場合、分散補償ファイバ11における分散値D1の分散スロープS1に対する比 $D1/S1$ と分散補償ファイバ12における分散値D2の分散スロープS2に対する比 $D2/S2$ とを比較して大きい値を有する分散補償ファイバ12から順次巻き付けられることが望ましい。このことは、所定の信号波長帯域の最長波長において、

分散補償ファイバ12の曲げ損失が分散補償ファイバ11の曲げ損失よりも小さいことに起因する。

また、図2に示した接続部13における被覆膜133、被覆膜134、および被覆膜135の材質は同一であることが望ましく、さらに被覆膜133および被覆膜134の外径R1、ならびに被覆膜135の外径R2の差は、可能な限り零に近いことが望ましい。

つぎに、分散補償モジュール10による伝送用光ファイバ18における分散および分散スロープの補償について、図4～6を参照して詳細に説明する。

図4は、伝送用光ファイバ18、分散補償ファイバ11、および分散補償ファイバ12が有する波長分散特性を示す波長対分散の相関図であり、相関曲線L1～L3は、それぞれ伝送用光ファイバ18、分散補償ファイバ11、および分散補償ファイバ12に対応している。ただし、相関曲線L2および相関曲線L3は、1460～1625nmの範囲の信号波長帯域における波長分散特性のみを図示する。

また、図5は、分散補償ファイバ11による補償後の伝送用光ファイバ18の波長分散特性を示す波長対分散の相関図であり、1460～1625nmの範囲の信号波長帯域における波長分散特性のみを図示する。

図5において、相関曲線L4は、分散補償ファイバ11による補償後の伝送用光ファイバ18の波長分散特性を示しており、その波長分散特性は、2本の破線で挟まれた幅 $\Delta a$ の範囲のばらつきを有する。すなわち、分散補償ファイバ11のみを用いて伝送用光ファイバ18の分散および分散スロープを補償する場合、その補償後の伝送用光ファイバ18における波長分散特性は、ばらつき $\Delta a$ を有する。

また、図6は、分散補償ファイバ11および分散補償ファイバ12によって構成された分散補償モジュール10による補償後の伝送用光ファイバ18の波長分散特性を示す波長対分散の相関図である。

図6において、相関曲線L5は、分散補償ファイバ12による補償後の伝送用光ファイバ18の波長分散特性を示しており、その波長分散特性は、2本の破線で挟まれた幅 $\Delta b$ の範囲のばらつきを有する。すなわち、分散補償ファイバ12のみを用いて伝送用光ファイバ18の分散および分散スロープを補償する場合、その補償後の伝送用光ファイバ18における波長分散特性は、ばらつき $\Delta b$ を有する。

ただし、分散補償モジュール10を用いて伝送用光ファイバ18の分散および分散スロープを補償する場合、その補償後の伝送用光ファイバ18における波長分散特性を示す相関曲線は、相関曲線L4のばらつき $\Delta a$ および相関曲線L5のばらつき $\Delta b$ の交差する範囲をばらつきとする。すなわち、分散補償モジュール10による補償後の伝送用光ファイバ18における波長分散特性は、ばらつき $\Delta c$ を有する。

ここで、上述した波長分散特性のばらつき $\Delta a \sim \Delta c$ において、ばらつき $\Delta a$ および、ばらつき $\Delta b$ は近似の関係であり、また、ばらつき $\Delta c$ は、ばらつき $\Delta a$ あるいは、ばらつき $\Delta b$ よりも小さい値である。したがって、分散補償ファイバ11および分散補償ファイバ12によって構成された分散補償モジュール10による伝送用光ファイバ18の分散および分散スロープを補償する能力は、分散補償ファイバ11のみ、または分散補償ファイバ12のみによって分散補償する場合と比較して、一層高性能化されている。

なお、上述した分散補償モジュール10による伝送用光ファイバ18に対する分散補償能力は、分散補償モジュール10の変形例である分散補償モジュール20においても同様である。

つぎに、分散補償モジュール20を用いた伝送用光ファイバ18の分散補償の具体例として、分散補償ファイバ11、12および伝送用光ファイバ18の波長分散特性シミュレーションによる評価試験結果について詳細に説明する。なお、この波長分散特性シミュレーションにおいて、信号波長帯域はCバンド（153



0～1565 nm) としている。

この波長分散特性シミュレーションにおいて、伝送用光ファイバ18は、分散値D0および分散スロープS0を有し、波長1550 nmにおける分散値D0および分散スロープS0は、それぞれ5.0 ps/nm/km、0.045 ps/nm<sup>2</sup>/kmである。また、伝送用光ファイバ18の条長は、80.0 kmである。この場合、伝送用光ファイバ18による全分散値および全分散スロープは、それぞれ400 ps/nm、3.6 ps/nm<sup>2</sup>である。なお、分散値D0の分散スロープS0に対する比D0/S0は、111.1になる。

また、分散補償ファイバ11は、分散値D1および分散スロープS1を有し、波長1550 nmにおける分散値D1および分散スロープS1は、それぞれ-95.0 ps/nm/km、-1.00 ps/nm<sup>2</sup>/kmである。また、分散補償ファイバ11の条長は、3.6 kmである。この場合、分散補償ファイバ11による全分散値および全分散スロープは、それぞれ-342 ps/nm、-3.6 ps/nm<sup>2</sup>である。なお、分散値D1の分散スロープS1に対する比D1/S1は、95.0になる。

さらに、分散補償ファイバ12は、分散値D2および分散スロープS2を有し、波長1550 nmにおける分散値D2および分散スロープS2は、それぞれ-120 ps/nm/km、-0.90 ps/nm<sup>2</sup>/kmである。また、分散補償ファイバ12の条長は、0.6 kmである。この場合、分散補償ファイバ12による全分散値および全分散スロープは、それぞれ-72 ps/nm、-0.54 ps/nm<sup>2</sup>である。なお、分散値D2の分散スロープS2に対する比D2/S2は、133.3になる。

ここで、分散補償ファイバ11、12を直列に接続した構成を有する分散補償モジュール20による伝送用光ファイバ18の分散補償の評価結果を表1に示す。なお、表1には、この評価試験に用いた伝送用光ファイバ18および分散補償

ファイバ11, 12の特性、ならびに分散補償ファイバ11, 12を直列に接続した状態での特性も示す。

【表1】

	条長 [km]	分散 [ps/nm/km]	分散 $\lambda D - \lambda^2$ [ps/nm <sup>2</sup> /km]	全分散 [ps/nm]	全分散 $\lambda D - \lambda^2$ [ps/nm <sup>2</sup> ]
分散補償ファイバ11	3.6	-95	-1.0	-342	-3.6
分散補償ファイバ12	0.6	-120	-0.90	-72	-0.54
分散補償モジュール10	4.2	-98.6	-0.986	-414	-4.14
伝送用光ファイバ18	80	5.0	0.045	400	3.6
評価試験結果	80	-0.175	-0.00675	-14	-0.54

なお、分散補償ファイバ11, 12は、モジュールとして局舎内に設置されるため、伝送路としては寄与しない。したがって、全分散値および全分散スロープを算出する場合、分散補償ファイバ11, 12の長さは、伝送路長として考慮していない。

表1に示すように、分散補償ファイバ11, 12を備えた分散補償モジュール20を用いて、伝送用光ファイバ18に累積される分散および分散スロープを補償すれば、波長1550nmにおける伝送用光ファイバ18の分散および分散スロープをそれぞれ $-0.175 \text{ ps/nm/km}$ 、 $-0.0068 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ に抑制可能である。すなわち、分散補償モジュール20によって補償された伝送用光ファイバ18の残留分散の絶対値は、 $0.5 \text{ ps/nm/km}$ 以下に抑制でき、その残留分散スロープの絶対値は、 $0.01 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下に抑制できる。

また、上述した波長分散特性シミュレーションにおいて、伝送用光ファイバ18の比 $D_0/S_0$ 、分散補償ファイバ11の比 $D_1/S_1$ 、および分散補償ファイバ12の比 $D_2/S_2$ は、 $0.8 \times (D_0/S_0) \leq D_1/S_1 < D_0/S_0$  および  $D_0/S_0 < D_2/S_2 \leq 1.2 \times (D_0/S_0)$  を満足しており、この

場合の分散補償ファイバ11, 12は、伝送用光ファイバ18の分散補償を行うファイバとして適した組み合わせになることがわかる。

さらに、伝送用光ファイバ18の分散補償に適した組み合わせの分散補償ファイバ11, 12を有する分散補償モジュール20は、その分散値 $D_t$  [ $\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ ] および分散スロープ $S_t$  [ $\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ ] が、 $D_t \leq -20$  および  $0.9 \times (D_0/S_0) \leq D_t/S_t \leq 1.1 \times (D_0/S_0)$  の関係を満足することがわかる。

ただし、分散補償モジュール20を構成する分散補償ファイバ11および分散補償ファイバ12は、曲げ損失増加の抑制を考慮し、波長1565nmにおける曲げ損失が比較的小さい分散補償ファイバ12から順次ボビン21に巻き付けられていることが望ましい。

なお、伝送用光ファイバ18の具体的な適用例としては、1.3 $\mu\text{m}$ 零分散シングルモードファイバ、1.5 $\mu\text{m}$ 分散シフトシングルモードファイバ、または、1.5 $\mu\text{m}$ 非零分散シングルモードファイバが考えられる。

本発明の実施の形態1にかかる分散補償モジュール10は、伝送用光ファイバ18に対して最適化された分散および分散スロープを有する2種類の分散補償ファイバ11および分散補償ファイバ12が直列に融着接続された構造を有することによって、Sバンド、Cバンド、およびLバンドに亘る1460～1625nmの全信号波長帯域におけるWDM伝送の伝送路に累積される分散および分散スロープを確実に補償することができ、さらに、補償後の伝送路における残留波長分散のばらつきを抑制することができる。

すなわち、分散補償モジュール10を用いて分散補償した光ファイバを伝送路とすることによって、伝送速度が高速化されたWDM伝送を高品質で実現することができる。

また、分散補償モジュール10の変形例である分散補償モジュール20は、伝送用光ファイバ18に対して最適化された分散および分散スロープを有する2種

類の分散補償ファイバ11および分散補償ファイバ12が直列に融着接続された構造を有しているため、分散補償モジュール10の場合と同様な高性能の分散補償能力を実現することができ、さらに、2種類の分散補償ファイバ11および分散補償ファイバ12が1体のボビン21に巻き付けられた構造を有しているため、その装置規模を一層小型化することができる。

また、分散補償モジュール20を構成する分散補償ファイバ11および分散補償ファイバ12を1体のボビン21に巻き付ける場合、所定の信号波長帯域の最長波長において比較的小さい曲げ損失を有する分散補償ファイバから順次ボビン21に巻き付けることによって、分散補償モジュールの曲げ損失の増加を抑制することができる。

さらに、本発明の実施の形態1では、信号波長帯域がCバンドであるWDM伝送用光ファイバに対して最適な分散補償能力を有する分散補償モジュールの場合を示したが、本発明は、これに限定されるものではなく、信号波長帯域がSバンドあるいはLバンドであるWDM伝送用光ファイバに対して最適な分散補償能力を有する分散補償モジュールに適用することもできる。

#### (実施の形態2)

上述した実施の形態1では、伝送用光ファイバに対して最適化された分散値および分散スロープを有する2種類の分散補償ファイバ同士が直列に融着接続され、この伝送用光ファイバに累積される分散および分散スロープを補償するとともに、その補償後の残留波長分散のばらつきを抑制するように構成された分散補償モジュールについて説明したが、この実施の形態2では、波長分散特性の異なる2種類の分散補償ファイバ同士を所定の条長比で直列に融着接続した構成を有し、1530～1625nmの波長範囲におけるWDM伝送の伝送用光ファイバの補償後の残留分散を $-0.3 \sim 0.3 \text{ ps/nm/km}$ の範囲に収めるようにしている。ここでは、伝送用光ファイバ18は、1290～1330nmの範囲の波長における低分散動作に対して最適化されている光ファイバである。

図7は、本発明の実施の形態2である分散補償モジュール30の構成を示す模式図である。ただし、分散補償ファイバを巻き付けるボビン、各ファイバ同士を接続する接続部、および伝送用光ファイバは、図3に示す分散補償モジュール20を構成する各部と同様の機能を有するので、同一符号を付するものとする。

図7において、分散補償モジュール30は、分散値D3および分散スロープS3を有する分散補償ファイバ31と、分散値D4および分散スロープS4を有する分散補償ファイバ32とが、接続部13を介して直列に融着接続された後、ボビン21に巻き付けられた構成を有している。また、分散補償ファイバ32は、接続部17を介して、伝送用光ファイバ18と直列にコネクタ接続され、さらに、光ファイバ31は、接続部16を介して、後段の伝送用光ファイバ18と直列にコネクタ接続されている。

なお、所定の信号波長帯域の最長波長において、分散補償ファイバ32の曲げ損失が、分散補償ファイバ31の曲げ損失に比して小さい、すなわち、分散値D4の分散スロープS4に対する比 $D4/S4$ が、分散値D3の分散スロープS3に対する比 $D3/S3$ に比して大きい値である場合、接続部13を介して直列に融着接続された分散補償ファイバ31および分散補償ファイバ32は、分散補償ファイバ32から順次ボビン21に巻き付けられることが望ましい。

つぎに、分散補償モジュール30による伝送用光ファイバ18における分散および分散スロープの補償について、具体的な数値を例示して詳細に説明する。図8は、1530～1625nmの波長範囲において、分散補償ファイバ31、分散補償ファイバ32、および分散補償モジュール30がそれぞれ有する分散値の波長特性を示す図であり、曲線L6a～L8aは、分散補償ファイバ31、分散補償ファイバ32、および分散補償モジュール30にそれぞれ対応している。

図8において、分散補償ファイバ31および分散補償ファイバ32は、1530～1625nmの波長範囲において、それぞれの分散値D3および分散値D4が、常に $-100\text{ ps/nm/km}$ 以下である光ファイバであり、さらに、15

30～1625 nmの波長範囲内の任意の波長における各分散値を比較した場合、分散値D3は、分散値D4に比して常に低い値である。

分散補償モジュール30は、各条長の比を3：7に調整された分散補償ファイバ31および分散補償ファイバ32が、直列に接続された構成を有する場合、1530～1625 nmの波長範囲において、常に $-100 \text{ ps/nm/km}$ 以下の分散値D<sub>t</sub>を有し、さらに、この分散値D<sub>t</sub>は、1530～1625 nmの波長範囲の任意の波長において、分散値D3以上、分散値D4以下の値を呈する。

図9は、上述した分散補償ファイバ31、分散補償ファイバ32、および分散補償モジュール30が、伝送用光ファイバ18に対して各々単独に接続され、その分散を補償した場合、伝送用光ファイバ18における1530～1625 nmの波長範囲内での残留分散の波長特性を示す図であり、曲線L6b～L8bは、分散補償ファイバ31、分散補償ファイバ32、および分散補償モジュール30にそれぞれ対応している。

分散補償ファイバ31、32は、それぞれ単独で伝送用光ファイバ18に接続した場合、波長1550 nmおよび1595 nmにおける伝送用光ファイバ18の残留分散を $0 \text{ ps/nm/km}$ にそれぞれ補償するように、各条長が調整されている。また、分散補償モジュール30は、波長1550 nmにおける伝送用光ファイバ18の残留分散を $0 \text{ ps/nm/km}$ に補償するように、条長が調整されている。

図10は、分散補償ファイバ31、分散補償ファイバ32、分散補償モジュール30、および伝送用光ファイバ18がそれぞれ有する分散スロープの波長に対する関係を示す図であり、曲線L6c～L8cは、分散補償ファイバ31、分散補償ファイバ32、および分散補償モジュール30に対応し、曲線L9は、伝送用光ファイバ18に対応している。

1530～1625 nmの波長範囲において、伝送用光ファイバ18の分散スロープの絶対値は、信号光の波長が長波長側に移行する場合、小さくなる傾向が

ある。したがって、上記波長範囲における高速WDM伝送用の伝送路として伝送用光ファイバ18を適用するためには、分散補償モジュール30の分散スロープの絶対値が、伝送用光ファイバ18と同様の減少傾向を示す必要がある。つまり、分散補償モジュール30の分散スロープの波長に対する増減関係は、伝送用光ファイバ18の分散スロープの波長に対する増減関係を打ち消すものであることが望ましい。

図10において、曲線L9は、波長が1530～1625 nmの波長範囲で長波長側に移行する場合、 $0 \sim 0.1 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ の範囲内に収まり、また、ほぼ直線的かつ緩やかに減少している。これに対して、曲線L6cは、波長が1530 nmから長波長側に移行するとともに減少し、波長1570 nm付近で極小になり、その後、波長1625 nmまで増加する傾向（波長に対して下に凸の変化）を示し、曲線L7cは、波長が1530 nmから長波長側に移行するとともに増加し、波長1580 nm付近で極大となり、その後、波長1625 nmまで減少する傾向（波長に対して上に凸の変化）を示している。すなわち、曲線L6cおよび曲線L7cは、曲線L9に比して、1530～1625 nmの波長範囲における分散スロープの変化量が大きく、さらに、それらの各曲線形状は、曲線L9の波長に対する分散スロープの増減変化を打ち消すものではない。したがって、分散補償ファイバ31または分散補償ファイバ32のどちらか一方のみでは、伝送用光ファイバ18が上述した高速WDM伝送の伝送路として機能するように、伝送用光ファイバ18に累積する分散スロープを補償することはできない。

一方、曲線L8cは、分散補償ファイバ31、32の組み合わせによって実現される分散補償モジュール30の分散スロープの変化に対応し、曲線L6cおよび曲線L7cを相互に打ち消しあった曲線形状を有している。曲線L8cは、波長が1530～1625 nmの波長範囲内で長波長側に移行する場合、緩やかに増加する傾向を示している。すなわち、曲線L8cは、曲線L9に比して、15

30～1625 nmの波長範囲における分散スロープの変化量が同等であり、かつ、その曲線形状は、曲線L9の波長に対する分散スロープの増減変化を打ち消すものである。したがって、分散補償モジュール30は、伝送用光ファイバ18に残留する分散の絶対値が $0.5 \text{ ps/nm/km}$ 以下になるように、伝送用光ファイバ18に累積する分散を補償するとともに、伝送用光ファイバ18に残留する分散スロープの絶対値を $0.01 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下にし、伝送用光ファイバ18が上述した高速WDM伝送の伝送路として機能するように、伝送用光ファイバ18に累積する分散スロープを補償することができる。

ここで、分散補償ファイバ31、32を実現する屈折率プロファイルの具体例について説明する。なお、本発明は、この具体例によって限定されるものではない。図11は、分散補償ファイバ31、32を実現する屈折率プロファイルおよび横断面を例示する図である。図11に示すように、分散補償ファイバ31、32は、3層のガラス層によって構成されるコアとその外周を覆うクラッド4となり、該コアは、内側から順次、第1コア1、第2コア2、および第3コア3を有する。第1コア1は外径 $a_1$ を有し、第2コア2は外径 $a_2$ を有し、第3コア3は外径 $a_3$ を有する。すなわち、外径 $a_3$ は、分散補償ファイバ31、32のコア径に相当する。また、第1コア1はクラッド4に対する比屈折率差 $\Delta 1$ を有し、第2コア2はクラッド4に対する比屈折率差 $\Delta 2$ を有し、第3コア3はクラッド4に対する比屈折率差 $\Delta 3$ を有する。

表2は、分散補償ファイバ31、32を実現する屈折率プロファイルを具体的に例示している。表2に示すように、分散補償ファイバ31は、比屈折率差 $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ 、 $\Delta 3$ が各々2.1、-0.6、0.24であり、外径 $a_2$ と外径 $a_1$ との比 $a_2/a_1$ が2.42であり、外径 $a_3$ と外径 $a_2$ との比 $a_3/a_2$ が1.96である。また、光ファイバとしたとき、コア径 $a_3$ が $14.4 \mu\text{m}$ である。また、分散補償ファイバ32は、比屈折率差 $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ 、 $\Delta 3$ が各々2.1、-0.



6、0.21であり、比 $a_2/a_1$ が2.66であり、比 $a_3/a_2$ が1.96である。また、光ファイバとしたとき、コア径 $a_3$ が15.0  $\mu\text{m}$ である。

【表 2】

	$\Delta 1$	$\Delta 2$	$\Delta 3$	$a_2/a_1$	$a_3/a_2$	$a_3[\mu\text{m}]$
分散補償ファイバ31	2.1	-0.6	0.24	2.42	1.96	14.4
分散補償ファイバ32	2.1	-0.6	0.21	2.66	1.96	15.0

この場合、分散補償ファイバ31は、図10の曲線L6cによって例示したように、波長が長波長側に移行するとともに下に凸の変化を呈する分散スロープを有する。また、分散補償ファイバ32は、図10の曲線L7cによって例示したように、波長が長波長側に移行するとともに上に凸の変化を呈する分散スロープを有する。したがって、図11および表2に例示される屈折率プロファイルを有する分散補償ファイバ31、32を用いた場合、分散補償ファイバ31と分散補償ファイバ32とを直列に接続した構成を有する分散補償モジュール30は、伝送用光ファイバ18の累積分散を小さくできるとともに、上述した高速WDM伝送の伝送路として用いられる伝送用光ファイバ18に累積する分散スロープを十分補償することができる。

なお、分散補償ファイバ31は、波長に対する分散スロープの変化が下に凸であればよく、その分散スロープの変化において極小値を持たなくてもよい。たとえば、分散補償ファイバ31の分散スロープは、波長が長波長側に移行する場合に、単調増加するとともにその増加率が徐々に大きくなる変化（第1の単調増加）を呈してもよいし、単調減少するとともにその減少率が徐々に小さくなる変化（第1の単調減少）を呈してもよい。一方、分散補償ファイバ32は、波長に対する分散スロープの変化が上に凸であればよく、その分散スロープの変化において極大値を持たなくてもよい。たとえば、分散補償ファイバ32の分散スロープは、波長が長波長側に移行する場合に、単調増加するとともにその増加率が徐々

に小さくなる変化（第２の単調増加）を呈してもよいし、単調減少するとともにその減少率が徐々に大きくなる変化（第２の単調減少）を呈してもよい。この場合、分散補償モジュール３０は、上述した第１の単調増加を呈する分散スロープを有する分散補償ファイバ３１と上述した第２の単調増加を呈する分散スロープを有する分散補償ファイバ３２とを組み合わせる構成される、あるいは、上述した第１の単調減少を呈する分散スロープを有する分散補償ファイバ３１と上述した第２の単調減少を呈する分散スロープを有する分散補償ファイバ３２とを組み合わせる構成されることが望ましい。

この実施の形態２では、分散補償モジュール３０が、波長変化にともなって下に凸の変化を呈する分散スロープを有する分散補償ファイバ３１と、波長変化にともなって上に凸の変化を呈する分散スロープを有する分散補償ファイバ３２とを所定の条長比で直列に融着接続した構成を有しているので、高速WDM伝送の伝送路として用いられる伝送用光ファイバが分散補償モジュール３０に接続された場合、この伝送用光ファイバの分散スロープを確実に補償することができる。さらに、 $1530 \sim 1625 \text{ nm}$ の波長範囲において、分散補償ファイバ３１、３２の各分散値がともに $-100 \text{ ps/nm/km}$ 以下に設定されているので、分散補償モジュール３０の分散値を常時 $-100 \text{ ps/nm/km}$ 以下にすることができ、これによって、分散補償モジュール３０によって補償された後の伝送用光ファイバに残留する分散の値を $-0.3 \sim 0.3 \text{ ps/nm/km}$ の範囲に収めることができ、 $1530 \sim 1625 \text{ nm}$ の波長範囲における複数の信号波長帯域による高速WDM伝送が行われる伝送路の累積分散および分散スロープを確実に補償する分散補償モジュールを実現できる。

また、分散補償ファイバ３１および分散補償ファイバ３２を１体のボビン２１に巻き付ける場合、所定の信号波長帯域の最長波長において比較的小さい曲げ損失を有する分散補償ファイバ３２から順次ボビン２１に巻き付けるようにしたので、分散補償モジュール３０全体の曲げ損失の増加を抑制することができ、さら

に、高速WDM伝送の伝送路を補償する分散補償モジュールを一層小型化することができる。

さらに、本発明の実施の形態2では、信号波長帯域がCバンドおよびLバンドであるWDM伝送用光ファイバに対して最適な分散補償能力を有する分散補償モジュールの場合を示したが、本発明は、これに限定されるものではなく、信号波長帯域がSバンドおよびCバンドであるWDM伝送用光ファイバなど、隣接した2つ以上の信号波長帯域に対して最適な分散補償能力を有する分散補償モジュールに適用することもできる。

なお、本発明の実施の形態1および実施の形態2では、異なる分散および分散スロープを有する2種類の分散補償ファイバが直列に接続された構造を有する分散補償モジュールの場合を示したが、本発明は、これに限定されるものではなく、それぞれ異なる分散および分散スロープを有する3種類以上の分散補償ファイバが直列に接続された構造を有する分散補償モジュールに適用することもできる。

特に、実施の形態2では、異なる分散および分散スロープを有する2種類の分散補償ファイバが直列に接続された構造を示した。しかし、これらの2本の分散補償ファイバは、各々単一の光ファイバからなる場合に限定されるものではなく、複数本の光ファイバが直列に接続されている分散補償ファイバによって各々構成することも可能である。

また、本発明の実施の形態1および実施の形態2では、分散補償モジュールを構成する分散補償ファイバ同士が直接融着接続されている場合を示したが、本発明は、これに限定されるものではなく、分散補償ファイバ同士がシングルモードファイバまたは分散シフトファイバを中間ファイバとして介在させて融着接続されている分散補償モジュール、あるいは分散補償ファイバ同士がコネクタを介して接続されている分散補償モジュールに適用することもできる。

さらに、本発明の実施の形態 1 および実施の形態 2 では、分散補償ファイバと伝送用光ファイバとがコネクタ接続されている分散補償モジュールの場合を示したが、本発明は、これに限定されるものではなく、分散補償ファイバと伝送用光ファイバとがシングルモードファイバまたは分散シフトファイバを中間ファイバとして介在させて融着接続されている分散補償モジュール、あるいは分散補償ファイバと伝送用光ファイバとが直接融着接続されている分散補償モジュールに適用することもできる。

また、本発明の実施の形態 1 および実施の形態 2 では、分散補償ファイバがガラス層によって構成されている分散補償モジュールの場合を示したが、本発明は、これに限定されるものではなく、プラスチック層によって構成された分散補償ファイバを有する分散補償モジュールに適用することもできる。

また、本発明の実施の形態 1 および実施の形態 2 では、分散補償ファイバ同士を融着接続する部分における保護手段が UV 硬化樹脂である分散補償モジュールの場合を示したが、本発明は、これに限定されるものではなく、分散補償ファイバ同士を融着接続する部分における保護手段として熱収縮チューブあるいはスリーブを用いた分散補償モジュールに適用することもできる。

### (実施の形態 3)

つぎに、本発明の実施の形態 3 にかかる光伝送システムの好適な実施の形態を詳細に説明する。図 1 2 は、本発明の実施の形態 3 にかかる光伝送システムの概略構成を示すブロック図である。なお、光伝送システム 1 0 0 を構成する伝送用光ファイバおよび分散補償モジュールは、上述した実施の形態 1 と同じであり、同一符号を付している。

図 1 2 において、光伝送システム 1 0 0 は、送信機 1 1 1 を備えた送信局 1 1 0 と、受信機 1 2 3 を備えた受信局 1 2 0 とを有し、送信局 1 1 1 および受信局 1 2 0 の間の伝送路として、伝送用光ファイバ 1 8 を有する。また、受信局 1 2 0 は、ラマン増幅器 1 2 1 と、分散補償システム 1 2 2 とを有している。

送信機 111 は、1460～1625 nm の波長範囲から任意に選択された波長を有する複数の信号光を合波した後、この合波した信号光を受信局 120 に向けて送信する。この場合、送信された信号光は、伝送用光ファイバ 18 を通って、受信局 120 に伝送される。

つぎに、受信局 120 に伝送された信号光は、ラマン増幅器 121 によって増幅される。この場合、ラマン増幅器 121 は、ラマン散乱光を発生させる励起光源、増幅用光ファイバ、光カップラを備えており、誘導ラマン散乱光によって、入力信号光を増幅する。その後、ラマン増幅器 121 によって増幅された信号光は、分散補償システム 122 に伝送される。

ここで、分散補償システム 122 は、分散補償モジュール 10 と励起光源 122a と光カップラ 122b とを有している。この場合、分散補償モジュール 10 は、分散補償システム 122 に伝送された信号光の分散および分散スロープを補償し、その後、この信号光は、ラマン増幅の媒体として機能する分散補償ファイバ 11, 12、励起光源 122a、および光カップラ 122b によって、増幅される。

その後、上述した分散補償システム 122 による補償および増幅がなされた信号光は、受信機 123 に伝送される。受信機 123 は、この信号光を波長毎に分波し、受信する。

なお、分散補償システム 122 において、分散補償モジュール 10 の代わりに、分散補償モジュール 20 または上述した実施の形態 2 にかかる分散補償モジュール 30 を用いてもよい。

本発明の実施の形態 3 である光伝送システム 100 は、1460～1625 nm の範囲から任意に選択された波長の信号光が、伝送用光ファイバ 18 を通って伝送され、また、この信号光の分散および分散スロープが、伝送用光ファイバ 18 に対して最適化された分散補償モジュール 10 によって、補償されるようにし、さらに、ラマン増幅媒体として機能する分散補償ファイバ 11, 12 によって

、この信号光を増幅し、その後、受信機１２３が、この信号光を受信するようにしたので、Ｓバンド、Ｃバンド、Ｌバンドに亘る１４６０～１６２５nmの波長範囲から任意に選択された波長の信号光を用いたWDM伝送における残留分散のばらつきを抑制することができ、これによって、高速WDM伝送に適した光伝送システムを実現できる。

また、上述した分散補償システム１２２における分散補償モジュール１０が、分散補償モジュール２０に置き換えられた場合、上述した作用効果を損なうことなく、一層小型化された光伝送システムを実現できる。

さらに、上述した分散補償システム１２２における分散補償モジュール１０が、分散補償モジュール３０に置き換えられた場合、上述した作用効果を損なうことなく、１４６０～１６２５nmの範囲から任意に選択された複数の信号波長帯域の信号光による高速WDM伝送の伝送路の累積分散および分散スロープを確実に補償でき、高速WDM伝送に適した光伝送システムを実現できる。

以上に説明したように、本発明にかかる分散補償モジュールによれば、接続手段が、負の分散値および負の分散スロープを有する第１の分散補償ファイバと、該第１の分散補償ファイバが有する負の分散値および負の分散スロープとそれぞれ異なる負の分散値および負の分散スロープを有する第２の分散補償ファイバとを直列に接続し、さらに、少なくとも１５３０～１６２５nmを含む任意の信号波長帯域において、前記第１の分散補償ファイバが有する分散スロープが波長変化にともない上に凸の変化を呈し、前記第２の分散補償ファイバが有する分散スロープが波長変化にともない下に凸の変化を呈するので、WDM伝送の伝送路における累積分散および累積分散スロープを確実に補償できるとともに、分散補償後の伝送路に残留する波長分散の値のばらつきを抑制することができ、さらに、少なくとも１５３０～１６２５nmを含む任意の信号波長帯域でのWDM伝送の累積分散および累積分散スロープを確実に補償できるという効果を奏する。

また、本発明にかかる光伝送システムによれば、本発明の分散補償モジュール

を少なくとも備えているので、それによる効果を享受することができ、高速化されたWDM伝送を確実に行うことができるという効果を奏する。

本発明を完全かつ明瞭に開示するために特徴的な実施例に関し記載してきた。しかし、添付の請求項は、上記実施例に限定されるべきものでなく、本明細書に示した基礎的事項の範囲内で当該技術分野の当業者が創作しうるすべての変形例及び代替可能な構成を具現化するように構成されるべきである。

## 請 求 の 範 囲

1. 伝送用光ファイバに累積される所定の信号波長帯域の分散および分散スロープを補償する少なくとも二つの分散補償ファイバを有する分散補償モジュールであって、

負の分散値および負の分散スロープを有する第1の分散補償ファイバと、

前記第1の分散補償ファイバが有する負の分散値および負の分散スロープとそれぞれ異なる負の分散値および負の分散スロープを有する第2の分散補償ファイバと、

前記第1の分散補償ファイバおよび前記第2の分散補償ファイバを直列に接続する接続手段と、

を備え、

前記所定の信号波長帯域は少なくとも1530～1625 nmを含む任意の信号波長帯域であり、

前記第1の分散補償ファイバが有する負の分散スロープは、波長変化にともない上に凸の変化を呈し、前記第2の分散補償ファイバが有する分散スロープは、波長変化にともない下に凸の変化を呈することを特徴とする分散補償モジュール。

2. 少なくとも前記第1の分散補償ファイバおよび前記第2の分散補償ファイバは、一つのボビンに巻き付けられることを特徴とする請求の範囲第1項に記載の分散補償モジュール。

3. 少なくとも前記第1の分散補償ファイバおよび前記第2の分散補償ファイバを一つのボビンに巻き付ける場合、前記所定の信号波長帯域の最も長波長における曲げ損失が小さい分散補償ファイバから順次巻き付けられることを特徴とす



る請求の範囲第 1 項に記載の分散補償モジュール。

4. 前記接続手段は、前記第 1 の分散補償ファイバと前記第 2 の分散補償ファイバとを融着接続することを特徴とする請求の範囲第 1 項に記載の分散補償モジュール。

5. 前記接続手段を被覆する保護手段を備えたことを特徴とする請求の範囲第 4 項に記載の分散補償モジュール。

6. 前記保護手段は、UV 硬化樹脂を用いて構成されていることを特徴とする請求の範囲第 5 項に記載の分散補償モジュール。

7. 前記所定の信号波長帯域の中心波長における当該分散補償モジュールの分散値  $D_t$  [ps/nm/km] は、 $D_t \leq -20$  の条件を満足することを特徴とする請求の範囲第 1 項に記載の分散補償モジュール。

8. 前記所定の信号波長帯域の中心波長における当該分散補償モジュールの分散値  $D_t$  [ps/nm/km] と分散スロープ  $S_t$  [ps/nm<sup>2</sup>/km] との比  $D_t/S_t$  は、前記伝送用光ファイバの分散値  $D_0$  [ps/nm/km] と分散スロープ  $S_0$  [ps/nm<sup>2</sup>/km] との比  $D_0/S_0$  に対して、

$$0.9 \times (D_0/S_0) \leq D_t/S_t \leq 1.1 \times (D_0/S_0)$$

の条件を満足することを特徴とする請求の範囲第 1 項に記載の分散補償モジュール。

9. 前記第 1 の分散補償ファイバの分散値と分散スロープとの比  $D_1/S_1$  は、前記伝送用光ファイバの分散値  $D_0$  [ps/nm/km] と分散スロープ  $S_0$

$[ps/nm^2/km]$  との比  $D_0/S_0$  に対して、

$$0.8 \times (D_0/S_0) \leq D_1/S_1 < D_0/S_0$$

の条件を満足し、

前記第2の分散補償ファイバの分散値と分散スロープとの比  $D_2/S_2$  は、前記比  $D_0/S_0$  に対して、

$$D_0/S_0 < D_2/S_2 \leq 1.2 \times (D_0/S_0)$$

の条件を満足することを特徴とする請求の範囲第1項に記載の分散補償モジュール。

10. 前記所定の信号波長帯域の中心波長において、当該分散補償モジュールによって補償された後の前記伝送用光ファイバの残留分散値の絶対値が  $0.5 ps/nm/km$  以下であり、かつ、該伝送用光ファイバの残留分散スロープの絶対値が  $0.01 ps/nm^2/km$  以下であることを特徴とする請求の範囲第1項に記載の分散補償モジュール。

11. 前記所定の信号波長帯域において、当該分散補償モジュールによって補償された後の前記伝送用光ファイバの残留分散値の絶対値が  $0.5 ps/nm/km$  以下であり、かつ、該伝送用光ファイバの残留分散スロープの絶対値が  $0.01 ps/nm^2/km$  以下であることを特徴とする請求の範囲第1項に記載の分散補償モジュール。

12. 前記第1の分散補償ファイバおよび前記第2の分散補償ファイバの少なくとも一つがラマン増幅媒体として機能することを特徴とする請求の範囲第1項に記載の分散補償モジュール。

13. 請求の範囲第1項に記載の分散補償モジュールを少なくとも備えたこと

を特徴とする光伝送システム。

## 要 約 書

負の分散値および負の分散スロープを有する第 1 の分散補償ファイバと、該第 1 の分散補償ファイバが有する負の分散値および負の分散スロープとそれぞれ異なる負の分散値および負の分散スロープを有する第 2 の分散補償ファイバとを直列に接続して分散補償モジュールを構成する。この第 1 の分散補償ファイバは、該第 1 の分散補償ファイバの分散スロープが波長変化にともない上に凸の変化を呈するように構成される。この第 2 の分散補償ファイバは、該第 2 の分散補償ファイバの分散スロープが波長変化にともない下に凸の変化を呈するように構成される。この分散補償モジュールに伝送用光ファイバが接続され、少なくとも 1530～1625 nm を含む任意に選定された信号波長帯域による WDM 伝送が行われた場合に、この分散補償モジュールは、この伝送用光ファイバに累積される分散および分散スロープを確実に補償する。